

Форму зависимости линейных размеров спиральных доменов от амплитуды переменного поля и величины градиента можно объяснить следующим образом. С одной стороны, известно, что время жизни  $T_g$  спиральных доменов увеличивается при наложении постоянного градиентного поля и его росте [3]; в исследуемом образце при частоте 5000 Гц в отсутствие градиентного поля максимальное среднее время жизни составляет 0,8 с, а вблизи области локального максимума линейных размеров ( $\text{grad } H = 290 \text{ Э/см}$ ,  $H_0 = 27 \text{ Э}$ )  $T_g = 4,0 \text{ с}$ . С ростом времени жизни спиральных доменов увеличивается число витков спирали, а значит и линейные размеры. С другой стороны, увеличение градиента магнитного поля ведет к уменьшению ширины области лабиринтной доменной структуры  $d$ , находящейся между двумя однодоменными структурами (рис.2б). Поскольку спиральные домены формируются внутри лабиринтной структуры, то  $l_2 \leq d$ , следовательно, продольный размер будет уменьшаться с увеличением градиента магнитного поля. На рис.2б представлена зависимость усредненного по амплитуде поля при фиксированном градиенте продольного линейного размера  $\langle l_2 \rangle$ , который начиная с  $\text{grad } H \approx 300 \text{ Э/см}$  уменьшается.

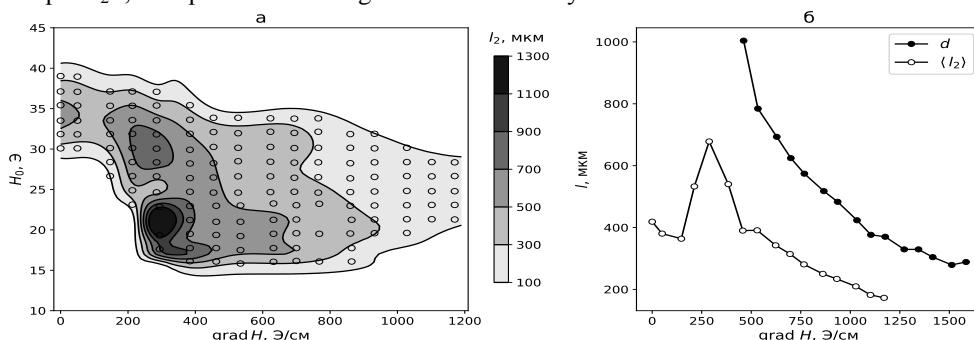


рис.2. а) зависимость продольного линейного размера спиральных доменов от амплитуды переменного поля и величины градиента при частоте 5000 Гц. б) зависимости от градиента магнитного поля ширины области лабиринтной доменной структуры и среднего продольного линейного размера спиральных доменов

Таким образом, в данной работе исследованы закономерности формирования цепочек спиральных динамических доменов в переменном магнитном поле с линейным градиентом. При варьировании амплитуды переменного поля в диапазоне 15–50 Э, градиента поля – до 1600 Э/см и частотах 1000, 5000 Гц получена зависимость линейных размеров спиральных доменов от параметров поля. Установлено, что в диапазоне значений градиента поля 200–400 Э/см существует локальный максимум линейных размеров. Время жизни спиральных доменов в локальном максимуме составляет 4,0 с, что в пять раз превышает максимальное время жизни в отсутствие градиента магнитного поля.

Работа выполнена в рамках базовой части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.6121.2017).

Список публикаций:

- [1] Кандаурова Г. С. // УФН. 2002. Т. 172. С.1165.
- [2] Успенская Л. С., Рахманов А. Л. // УФН. 2012. Т. 182. С.681.
- [3] Pashko A. G et al. // Solid State Phenomena. 2011. Т. 168. С.227.

## Сравнительные исследования технологически важных параметров тоноклёночного сенсорного элемента с гигантским магнитоимпедансным эффектом, полученных экспериментально и моделированием при помощи Comsol

**Членова Анна Александровна**

Волчков Станислав Олегович, Курляндская Галина Владимировна  
Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина  
Курляндская Галина Владимировна, д.ф.-м.н.  
[chlenova.anna@gmail.com](mailto:chlenova.anna@gmail.com)

Детектирование слабых магнитных полей – широкоостребованная область приложений магнитных материалов и активноразвивающаяся область физики магнитных явлений. В ряду основных характеристик сенсорных элементов следует упомянуть малые размеры, высокую чувствительность по отношению к внешнему магнитному полю, а также устойчивость по отношению к факторам внешней среды. Работа детекторов слабых магнитных полей может быть основана на таких магнитных эффектах, как эффект Холла, индуктивный эффект, эффект анизотропного магнитосопротивления, гигантский магниторезистивный эффект и гигантский магнитоимпедансный эффект и др. Магнитоимпедансный (МИ) эффект – это явление изменения полного электросопротивления магнитного проводника ( $|Z|^2 = |R|^2 + |X|^2$ ) на переменном токе под действием внешнего постоянного магнитного поля, где  $R$  – активная и  $X$  – реактивная составляющие полного электросопротивления [1]. Приложение такого поля приводит к намагничиванию ферромагнитного проводника

и изменению его магнитной проницаемости. От нее в свою очередь зависят величина скин-эффекта и индуктивность, что в итоге приводит к изменению соответственно активной и реактивной составляющих полного сопротивления. Именно высокая чувствительность по отношению к внешнему магнитному полю выгодно отличает МИ эффект при сравнении с другими магнитными эффектами. В случае МИ чувствительность по отношению к внешнему магнитному полю может достигать 300 %/Э даже в случае тонкопленочных сенсорных элементов, наиболее совместимых с электроникой. Температура является неотъемлемой характеристикой внешней среды, однако, пленочные многослойные структуры, проявляющие высокие МИ характеристики, представляют собой сложные объекты для температурных исследований.

В данной работе были получены и исследованы структуры типа  $(\text{Cu}[3 \text{ нм}]/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}[100 \text{ нм}])_5/\text{Cu}[500 \text{ нм}]/(\text{Cu}[3 \text{ нм}]/\text{Fe}_{19}\text{Ni}_{81}[100 \text{ нм}])_5$  с высоким МИ соотношением и чувствительностью по отношению к магнитному полю. Для них была создана математическая модель, описывающая МИ характеристики тонкопленочной структуры в зависимости от температуры внешней среды, на основе полученных экспериментальных данных. Прослойки меди толщиной 3 нм препятствуют образованию в напыляемых структурах «закритического» состояния, приводящего к потере магнитной мягкости [2]. Для проведения экспериментов при помощи магнетронного распыления были получены образцы в виде полосок  $1 \times 10$  (мм), (рис.1). Пленочные структуры были аттестованы на магнитооптическом Керр-микроскопе и с помощью СКВИД-магнитометрии, измерение электросопротивления проводилось на постоянном токе, а измерение импеданса на переменном токе при помощи усовершенствованного автоматизированного комплекса МИ спектроскопии на основе анализатора импеданса Agilent 4294A [12]. МИ соотношение полного электросопротивления вычислялось по формуле  $\Delta Z/Z = 100\% \times [Z(H) - Z(H_{\max})]/Z(H_{\max})$ , где  $H_{\max} = 150$  Э.

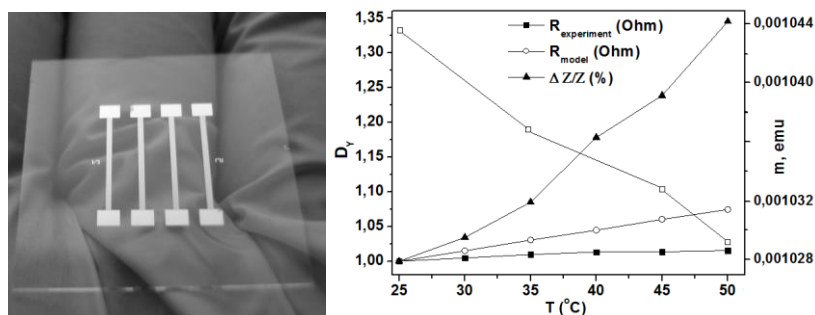


рис.1.(a) – Общий вид четырех пленочных МИ элементов с контактами на одной стеклянной подложке. (b) Температурная зависимость  $D_Y$ , где  $Y = R_{\text{experiment}}/R_{\text{model}}$ ,  $\Delta Z/Z$  и величины  $m$  – намагниченности насыщения при температурах 25, 35, 45 и 50 °C

Температурные исследования были ограничены интервалом от 25 °C до 50 °C, наиболее интересным с точки зрения приложений. Например, он соответствует режиму функционирования живых организмов, а также включает стандартную комнатную температуру. Теоретическая модель была создана в программном пакете Comsol Multiphysics 5.2a, на основе трехслойного сэндвича типа  $\text{FeNi}[100 \text{ мкм}]/\text{Cu}[100 \text{ мкм}]/\text{FeNi}[100 \text{ мкм}]$ , с количеством степеней свободы порядка 800000. Физические параметры рассматриваемых материалов: для FeNi температурный коэффициент электрического сопротивления  $\alpha = 3,9 \times 10^{-3}$  (1/°C), электрическая проводимость  $\sigma = 1,74 \times 10^6$  Ом<sup>-1</sup>, удельное сопротивление в 0 °C  $\rho_0 = 18,8 \times 10^{-6}$  Ом·см; для Cu  $\alpha = 3,9 \times 10^{-3}$  (1/°C),  $\sigma = 5,998 \times 10^7$  Ом<sup>-1</sup>,  $\rho_0 = 1,72 \times 10^{-6}$  Ом·см. Для увеличения точности расчетов с учетом скин-эффекта было введено дополнительное дробление сетки вблизи поверхности образца. Одной из основных величин, определяющих сопротивление металлического проводника при протекании по нему высокочастотного тока является глубина скин-слоя ( $\delta$ ), рассчитываемая как  $\delta = c \times ((\rho \epsilon_0)/2\pi \mu f)^{1/2}$ , где  $c$  – скорость света,  $\rho$  – удельное сопротивление,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость и  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная. Соответственно, основной целью являлось рассмотреть температурную зависимость удельного сопротивления и относительной магнитной проницаемости. Для удобства обсуждения был введен параметр  $D_Y = Y(T=X \text{ °C})/Y(T=25 \text{ °C})$ , где  $Y = R_{\text{experiment}}/R_{\text{model}}$ ,  $\Delta Z/Z$  и  $m$  – намагниченность насыщения, а  $X = 25, 30, 35, 40, 45, 50$  °C (см. рис.1).

Как можно видеть из рисунка, активные компоненты сопротивления  $R_{\text{experiment}}$  и  $R_{\text{model}}$  слабо зависят от температуры, тогда как МИ соотношение полного импеданса, увеличивается при росте температуры от 25 до 50 °C на 18%. Различие в степени возрастания, диктуемое величиной температурного коэффициента электрического сопротивления, можно связать с отсутствием вклада шероховатости поверхности модельного объекта. Слабо зависит от температуры и намагниченность насыщения, благодаря чему можно предположить, что основной вклад в температурную зависимость МИ соотношения вносят изменения магнитной проницаемости, связанные с магнитоупругими эффектами, моделирование которых представлено в работе.

Список публикаций:

- [1] В.О.Васильковский, Г.В.Курляндская, Н.В.Мушников, П.А. Савин, Ю.Н. Стародубцев, Физика, технологии и техника магнитных материалов. Учебное пособие. – Екатеринбург. : УрГУ, 2010. – 247 с.
- [2] G.V. Kurl'yand'skaya, A.A. Chlenova, S.O. Volch'kov, V.N. Lepalovskij, R. El Kammouni, Solid State Phenomena, 215, 342 (2014).
- [3] А.В. Семиров, А.А. Мусеев, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, А.А. Гаврилюк и др., Научное приборостроение, 20, 42 (2010).